



Department of Digital Business

**Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)**

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 3 (2025) pp: 5059-5068

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

---

## Marine Debris di Perairan Teluk Kendari: Sebuah Analisis Komparatif Spasial Melalui Platform Google Earth Engine (2023 vs. 2025)

Asramid Yasin

Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

[asramidvasin@uho.ac.id](mailto:asramidvasin@uho.ac.id)

### Abstrak

*Pencemaran sampah laut (marine debris) di perairan Teluk Kendari telah menjadi ancaman serius terhadap ekosistem pesisir dan kesehatan masyarakat sekitar. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, memetakan, dan menganalisis sebaran serta kepadatan marine debris menggunakan citra satelit Sentinel-2 dan algoritma Floating Debris Index (FDI) dalam platform Google Earth Engine (GEE) pada periode 2023 vs. 2025. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebaran debris tidak merata, dengan konsentrasi tertinggi terdeteksi di sekitar muara sungai, pelabuhan, dan area beraktivitas antropogenik tinggi. Nilai FDI berkisar antara 0,0506–0,9222 (tahun 2023) dan 0,0487–0,8085 (tahun 2025), dengan nilai maksimum masuk kategori Kelas 3 ( $FDI \geq 0,3$ ) yang mengindikasikan keberadaan macroplastic dan agregasi plastik padat. Estimasi kepadatan debris mencapai  $>50 \text{ g/m}^2$  di beberapa hotspot, menunjukkan akumulasi yang mengkhawatirkan dan persisten. Tidak terdapat perubahan signifikan dalam pola sebaran antara kedua tahun, mengindikasikan bahwa tekanan antropogenik dan input sampah masih berlanjut tanpa intervensi mitigasi efektif. Faktor hidrodinamika seperti arus dan angin berperan penting dalam memusatkan debris. Penelitian ini merekomendasikan strategi pengelolaan berbasis data, pemantauan rutin, pembersihan terfokus, dan penguatan kebijakan pengelolaan sampah darat. Studi lanjutan dengan resolusi tinggi dan pemodelan hidrodinamika diperlukan untuk memahami dinamika debris secara lebih komprehensif.*

*Kata kunci: Marine Debris, Teluk Kendari, Google Earth Engine, FDI, Sentinel-2, Penginderaan Jauh.*

### 1. Latar Belakang

Ancaman pencemaran plastik di lingkungan laut telah mencapai proporsi krisis global, dengan marine debris menjadi salah satu tantangan lingkungan paling kompleks dan persisten di abad ke-21 [1]. Setiap tahun, jutaan ton sampah plastik memasuki ekosistem laut, mengancam keanekaragaman hayati, keselamatan navigasi, kesehatan manusia, dan keberlanjutan industri perikanan dan pariwisata [2]. Wilayah pesisir dan teluk, yang menjadi titik pertemuan antara aktivitas antropogenik dan ekosistem laut, merupakan area yang paling rentan terhadap akumulasi marine debris ini [3].

Teluk Kendari, sebagai pusat ekonomi, pemerintahan, dan pemukiman utama Provinsi Sulawesi Tenggara, tidak lepas dari tekanan lingkungan ini. Pertumbuhan populasi, urbanisasi yang cepat, serta aktivitas pelabuhan, perikanan, dan sungai-sungai yang bermuara di teluk ini berkontribusi signifikan terhadap masuknya sampah ke perairan [4]. Sampah yang terdampar di pesisir pantai Teluk Kendari bukan hanya merusak keindahan landscape tetapi juga berdampak pada ekosistem mangrove dan biota laut yang ada [5]. Upaya pengelolaan dan pembersihan yang efektif memerlukan data spasial yang akurat dan temporal mengenai sebaran dan kepadatan marine debris.

Namun, pemantauan marine debris secara konvensional melalui survei lapangan seringkali terkendala oleh keterbatasan biaya, waktu, tenaga, dan jangkauan geografis. Pemantauan yang bersifat snapshot juga kurang mampu menangkap dinamika temporal dan spasial yang cepat berubah. Dalam konteks inilah, teknologi penginderaan jauh dan komputasi awan (cloud computing) hadir sebagai solusi revolusioner. GEE merupakan platform komputasi awan yang powerful yang menyediakan akses ke katalog data geospasial yang masif (seperti citra satelit Sentinel-2, Landsat, dan MODIS) beserta kemampuan pemrosesan yang tinggi [6]. GEE memungkinkan para peneliti untuk menganalisis perubahan lingkungan dalam skala luas dan resolusi tinggi secara efisien, tanpa perlu mengunduh data dalam volume yang sangat besar.

Beberapa penelitian perintis telah mulai memanfaatkan machine learning pada GEE untuk mendeteksi marine debris, terutama sampah yang terdampar di pantai dan mengapung di permukaan air [7] [8]. Pendekatan ini menawarkan metodologi yang dapat direplikasi, skalabel, dan near real-time. Namun, aplikasinya secara spesifik untuk memetakan dan menganalisis dinamika marine debris di perairan Indonesia, khususnya perairan Teluk Kendari, masih sangat terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini berjudul "Marine Debris di perairan Teluk Kendari: Sebuah Analisis Komparatif Spasial Melalui Platform Google Earth Engine (2023 vs. 2025)" dirancang untuk menjawab kebutuhan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi dan memetakan sebaran dan kepadatan marine debris di perairan Teluk Kendari dengan memanfaatkan citra satelit dan algoritma machine learning pada platform GEE dan (2) menganalisis perubahan spasial dan temporal sebaran dan kepadatan marine debris antara tahun 2023 vs. 2025 di perairan Teluk Kendari dengan memanfaatkan citra satelit dan algoritma machine learning pada platform GEE.

Dengan membandingkan dua titik waktu yang berbeda, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai tren akumulasi sampah, mengidentifikasi hotspot pencemaran, dan mengevaluasi efektivitas kebijakan pengelolaan sampah yang mungkin telah diterapkan dalam kurun waktu tersebut. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah yang kuat bagi pemerintah daerah, komunitas, dan pemangku kepentingan lainnya dalam merumuskan strategi mitigasi dan kebijakan pengelolaan marine debris yang lebih terarah, efektif, dan berbasis data.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Waktu dan Lokasi

Penelitian ini merupakan studi analisis spasial temporal yang memanfaatkan data citra satelit yaitu Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI). Pemilihan Sentinel-2 didasarkan pada pertimbangan teknis dan operasional yang sangat sesuai dengan tujuan deteksi marine debris, yaitu: resolusi spasial, resolusi spektral, resolusi temporal, dan aksesibilitas. Sentinel-2 MSI dinilai sebagai sumber data yang paling optimal untuk menyeimbangkan antara kebutuhan detail spasial, kedalaman informasi spektral, frekuensi pengamatan, dan kelayakan biaya untuk penelitian pemantauan marine debris skala regional seperti di perairan Teluk Kendari. Kombinasi antara kemampuan teknis Sentinel-2 dan kekuatan komputasi GEE menciptakan metodologi yang robust, dapat direplikasi, dan efisien untuk analisis spasial-temporal. Pengambilan data primer citra satelit dan proses analisis dilakukan secara daring (online) melalui platform GEE. Periode pengambilan data citra difokuskan pada dua titik waktu untuk analisis komparatif: (1) periode 1 (awal): 01 Januari 2023 – 31 Desember 2023 (data dasar/baseline), (2) periode 2 (terkini): 01 Januari 2025 – 01 Agustus 2025 (data pembanding).

Pemilihan rentang waktu tersebut untuk setiap periode bertujuan untuk meminimalisasi bias yang disebabkan oleh variabilitas musiman, seperti pola angin monsoon, intensitas hujan, dan arus permukaan laut, yang sangat mempengaruhi sebaran marine debris. Dengan menggunakan data gabungan (composite) tersebut, diharapkan dapat dihasilkan peta sebaran marine debris yang lebih representatif untuk masing-masing tahun analisis. Pemrosesan data dan analisis dilakukan pada periode Agustus 2025.

Lokasi penelitian berpusat di Teluk Kendari, yang terletak di Kota Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara, Indonesia. Secara geografis, teluk ini berada pada koordinat  $3^{\circ}51'00''$  -  $4^{\circ}01'30''$  Lintang Selatan dan  $122^{\circ}20'30''$  -  $122^{\circ}40'00''$  Bujur Timur yang dapat dilihat pada Gambar 1. Batas Area of Interest (AOI) untuk penelitian ini didefinisikan secara digital pada platform GEE mencakup seluruh perairan Teluk Kendari serta garis pantai di sekitarnya, yang diperkirakan menjadi daerah akumulasi marine debris.



DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v4i3.2722>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Gambar 1. Lokasi Penelitian di Perairan Teluk Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia dengan Menggunakan Citra Satelit Sentinel-2 per Tanggal 01 Agustus 2025

Teluk Kendari dipilih sebagai area studi berdasarkan pertimbangan kriteria berikut:

- 1) Tekanan Antropogenik Tinggi: Teluk Kendari ini merupakan jantung aktivitas masyarakat Kota Kendari. Beragam aktivitas manusia berpusat di sini, termasuk permukiman padat penduduk, pelabuhan penyeberangan (Pelabuhan Nusantara), pelabuhan perikanan, kegiatan perikanan tangkap dan budidaya, industri, dan pariwisata. Aktivitas-aktivitas ini merupakan sumber utama (sources) dari marine debris.
- 2) Morfologi yang Mendukung Akumulasi: Secara geomorfologis, Teluk Kendari merupakan teluk semi-tertutup (semi-enclosed bay) dengan muara beberapa sungai utama, seperti Sungai Wanggu dan Sungai Lahumbo. Morfologi ini menyebabkan sirkulasi air yang terbatas, sehingga berpotensi besar menjadi tempat akumulasi (sink) untuk berbagai polutan, termasuk sampah plastik yang terbawa dari daratan maupun dari aktivitas di perairan.
- 3) Nilai Ekologis dan Ekonomis yang Penting: Kawasan pesisir Teluk Kendari didominasi oleh ekosistem mangrove yang memiliki fungsi ekologis vital sebagai tempat pemijahan ikan dan penyerap karbon. Adanya tekanan marine debris mengancam kelestarian ekosistem ini dan pada gilirannya berdampak pada keberlanjutan ekonomi masyarakat yang bergantung pada sektor perikanan [5].
- 4) Ketersediaan Data yang Memadai: Lokasi ini tercakup dengan baik oleh liputan citra satelit resolusi menengah (seperti Sentinel-2) yang tersedia di platform GEE, dengan frekuensi perekaman yang tinggi sehingga memungkinkan untuk membuat citra komposit yang bebas awan.

## 2.2. Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian observasional dengan pendekatan analisis spasial-temporal. Desain penelitian dirancang untuk mengidentifikasi, memetakan, dan membandingkan sebaran dan kepadatan marine debris di Teluk Kendari pada dua titik waktu yang berbeda (tahun 2023 vs. 2025) secara kuantitatif. Keseluruhan proses analisis dilakukan secara daring (cloud-based) dengan memanfaatkan platform GEE, yang memungkinkan penanganan data citra satelit dalam skala besar dan komputasi yang efisien [6].

## 2.3. Sumber Data dan Pre-Processing

### 1) Data Citra Stelit

Data primer yang digunakan adalah citra satelit Sentinel-2 MSI level-2A (yang telah dikoreksi atmosfer) yang diakses dari katalog GEE. Pemilihan Sentinel-2 didasarkan pada:

- a) Resolusi Spasial: 10 meter dan 5 meter untuk band visible dan Near-Infrared (NIR), optimal untuk mendeteksi agregasi macro-debris [7].
- b) Resolusi Spektral: Memiliki band NIR dan Short-Wave Infrared (SWIR) yang krusial untuk membedakan debris dari air laut karena absorpsi kuat oleh air pada gelombang ini [9].
- c) Resolusi Temporal: Menerapkan algoritma penghapusan awan. Selain itu juga membatasi agar hanya mendapat daerah perairan dengan menggunakan rumus Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI).

### 2) Pre-processing di GEE

Seluruh pre-processing dilakukan secara otomatis dan konsisten di GEE:

- a) Pemfilteran Data: Citra difilter berdasarkan periode penelitian dan lokasi (Area of Interest atau AOI perairan Teluk Kendari).
- b) Masking Awan: Masking awan dan bayangan awan dilakukan menggunakan band QA (Quality Assessment) yang disediakan dalam metadata citra Sentinel-2 MSI level-2A serta menerapkan algoritma penghapusan awan.
- c) Pembatasan agar Hanya Mendapat Daerah Perairan: Menggunakan rumus MNDWI yaitu  $(GREEN-SWIR1)/(GREEN+SWIR1)$  atau menggunakan B3 dan B11. Hasil MNDWI berentang dari -1 sampai 1, perairan didefinisikan jika memiliki nilai  $MNDWI > 0$ , sehingga perairan adalah  $MNDWI.gt(0).selfMask()$ .
- d) Pembuatan Komposit Median: Untuk masing-masing periode (2023 dan 2025), dibuat komposit citra menggunakan fungsi median. Teknik ini mengurangi noise seperti awan sisa, sunglare, dan variasi temporal jangka pendek, sehingga menghasilkan citra representatif kondisi median untuk satu tahun [10].

## 2.4. Analisis Data

## 1) Ekstraksi marine debris menggunakan FDI

FDI adalah indeks spektral yang dirancang khusus untuk mendeteksi puing-puing laut (marine debris) yang mengapung di permukaan air. Nilai FDI yang dihasilkan dari pemrosesan citra satelit memiliki makna khusus dalam mengidentifikasi keberadaan dan kepadatan marine debris.

Marine debris yang mengapung diekstraksi menggunakan algoritma FDI yang dikembangkan khusus untuk Sentinel-2 [11]. Indeks ini memanfaatkan reflektansi tinggi debris pada band SWIR dan NIR dibandingkan dengan air laut yang dapat dilihat pada persamaan 1 berikut.

$$FDI = R_{rs, NIR} - (R_{rs, RE2} + (R_{rs, SWIR1} - R_{rs, RE2}) * \frac{(\lambda_{NIR} - \lambda_{RED})}{(\lambda_{SWIR1} - \lambda_{RED})}) * 10$$

dimana:

FDI = Floating debris index

Rrs = Reflektansi permukaan yang telah dikoreksi (Level-2A)

NIR = Near-infrared

RE2 = Red edge

SWIR1 = Short-wave infrared

$\lambda$  = Panjang gelombang pusat untuk band yang sesuai.

Hasil FDI, kemudian dipetakan dan dicari nilai range tertinggi untuk kemudian dimasking serta dilakukan juga normalisasi data agar data FDI yang dihasilkan tidak bias. Pixel dengan nilai FDI di atas ambang batas (threshold) tertentu akan diklasifikasikan sebagai marine debris. Threshold ditentukan secara iteratif melalui pemeriksaan visual terhadap sampel citra dan akan diterapkan secara konsisten untuk kedua periode (2023 vs. 2025).

## 2) Mekanisme klasifikasi threshold-based

Klasifikasi FDI umumnya menggunakan pendekatan threshold-based dimana nilai FDI kontinu dikelompokkan menjadi beberapa kelas berdasarkan ambang batas yang ditentukan secara empiris yang dapat dilihat pada masing-masing tabel berikut.

Tabel 1. Klasifikasi Berdasarkan Rentang Nilai [11]

Kelas FDI	Rentang Nilai	Interpretasi	Karakteristik Material
Kelas 0	FDI < -0,1	Material organik	Fitoplankton, alga, material vegetasi
Kelas 1	-0,1 ≤ FDI < 0,1	Perairan normal	Air laut tanpa <i>debris</i> signifikan
Kelas 2	0,1 ≤ FDI < 0,3	<i>Debris</i> potensial	Campuran material, <i>debris</i> kecil
Kelas 3	FDI ≥ 0,3	Plastik kemungkinan tinggi	Makroplastik, agregasi plastik

Tabel 2. Klasifikasi Berdasarkan Tipe Material [12]

Tipe Material	Rentang FDI	Karakteristik Spektral
Air Laut Jernih	-0,15 - 0,05	Reflektansi rendah semua <i>band</i>
Material Organik	-0,25 - (-0,05)	Absorpsi biru, reflektansi NIR tinggi
Plastik Transparan	0,15 - 0,35	Reflektansi biru tinggi, NIR sedang
Plastik Putih	0,30 - 0,50	Reflektansi tinggi semua <i>band visible</i>
Plastik Berwarna	0,10 - 0,40	Variasi tergantung pigmentasi

Tabel 3. Klasifikasi Berdasarkan Kepadatan *debris* [13]

Kategori Kepadatan	Rentang FDI	Estimasi Kepadatan
Sangat Rendah	0,1 - 0,2	< 5 g/m <sup>2</sup>
Rendah	0,2 - 0,3	5 - 20 g/m <sup>2</sup>
Sedang	0,3 - 0,4	20 - 50 g/m <sup>2</sup>
Tinggi	> 0,4	> 50 g/m <sup>2</sup>

Klasifikasi nilai FDI merupakan proses kritis dalam interpretasi hasil pemrosesan citra satelit untuk identifikasi dan kuantifikasi marine debris. Proses ini mentransformasikan nilai indeks spektral kontinu menjadi kategori diskrit yang bermakna secara ekologis dan operasional.

Sedangkan analisis spasial komparatif dilakukan dengan cara:

- a) Generasi Peta Sebaran: Hasil klasifikasi FDI diekspor sebagai peta biner (1: debris, 0: non-debris) untuk tahun 2023 dan 2025.
- b) Analisis Hotspot: Kepadatan debris dihitung menggunakan klasifikasi Biermann et al., (2020) untuk mengidentifikasi zona akumulasi (hotspot) pada masing-masing tahun.
- c) Analisis Perubahan: Perubahan spasial dianalisis dengan membandingkan luas total area debris dan distribusi kepadatan antara 2023 vs. 2025. Perubahan pada hotspot tertentu (seperti di muara sungai atau dekat pelabuhan) akan dianalisis secara kualitatif dan dikaitkan dengan faktor pemicu.

### 3. Hasil dan Diskusi

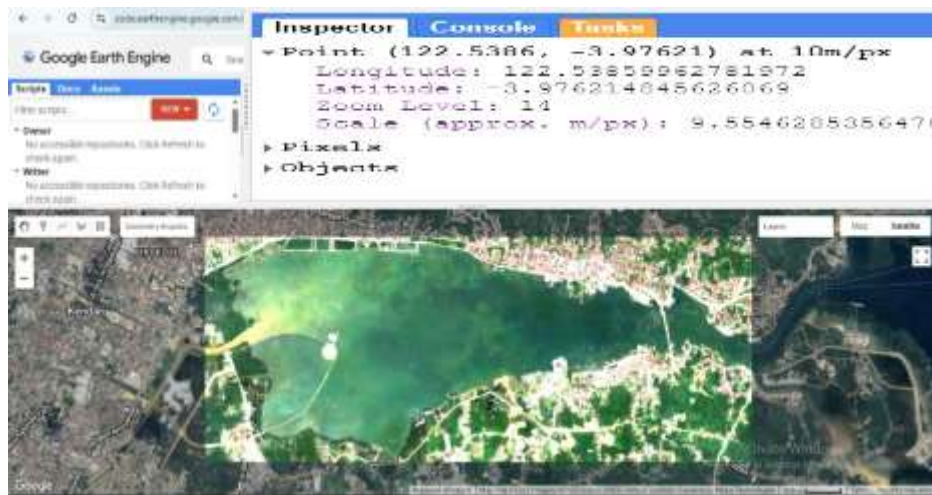
Hasil penelitian didasarkan pada urutan logis untuk membentuk sebuah cerita. Isinya menunjukkan fakta/data. Dapat menggunakan Tabel dan Angka tetapi tidak mengulangi data yang sama dalam gambar, tabel, dan teks. Untuk lebih memperjelas deskripsi, dapat menggunakan subtitle.

Diskusi adalah penjelasan dasar, hubungan, dan generalisasi yang ditunjukkan oleh hasilnya. Deskripsi menjawab pertanyaan penelitian. Jika ada hasil yang meragukan, tunjukkan secara objektif.

#### 3.1. Identifikasi Sebaran dan Kepadatan Spasial Marine Debris di Perairan Teluk Kendari pada Tahun 2023 (per 01 Januari 2023 – 31 Desember 2023)

##### 1) Visualisasi citra dan identifikasi fitur permukaan

Analisis sebaran marine debris di perairan Teluk Kendari pada tahun 2023 dilakukan dengan memanfaatkan citra satelit Sentinel-2 yang memiliki resolusi spasial 10 meter per piksel. Setiap piksel pada citra merepresentasikan area seluas 100 m<sup>2</sup> di permukaan bumi, dengan tingkat pembesaran (zoom level) 14 pada platform GEE untuk memastikan tampilan yang cukup detail. Komposisi true color (band 4, 3, 2) digunakan untuk membedakan fitur-fitur permukaan, di mana perairan tampak dalam variasi warna biru hingga coklat kehijauan tergantung pada tingkat kekeruhan, kedalaman, dan sedimentasi. Vegetasi pesisir seperti mangrove teridentifikasi dengan warna hijau tua, sementara wilayah urban dan infrastruktur Kota Kendari ditandai dengan reflektansi tinggi berwarna abu-abu hingga putih. Area terdeteksi marine debris dan sedimen muncul sebagai wilayah berwarna cerah (krem hingga merah) pada permukaan air (Gambar 2).



Gambar 2. Visualisasi Citra dan Identifikasi Fitur Permukaan di Perairan Teluk Kendari Tahun 2023

##### 2) Deteksi *marine debris* menggunakan FDI

Untuk mendeteksi marine debris mengapung secara spesifik, digunakan FDI, sebuah indeks spektral yang memanfaatkan kombinasi band NIR, Red Edge, dan SWIR pada citra Sentinel-2. Indeks ini mampu membedakan material asing seperti plastik, kayu, atau alga dari air laut bersih. Nilai FDI yang diperoleh kemudian dinormalisasi ke dalam rentang 0 hingga 1 untuk mempermudah analisis komparatif. Hasil

normalisasi FDI di perairan Teluk Kendari tahun 2023 menunjukkan rentang nilai dari 0,0506 hingga 0,9222. Nilai minimum (mendekati 0) mengindikasikan area dengan minimal material terapung (clean water), sedangkan nilai maksimum (mendekati 1) menandakan konsentrasi tertinggi material terapung yang berpotensi sebagai marine debris.

Visualisasi FDI menunjukkan area dengan nilai tinggi (0,9222) sebagai hotspot berwarna merah, nilai menengah (sekitar 0,5) sebagai area krem dengan material terapung sedang, dan area biru (nilai <0,0506) sebagai perairan bersih (Gambar 4). Selanjutnya, dilakukan klasifikasi biner dimana piksel dengan nilai 1 dikategorikan sebagai terdeteksi debris, dan nilai 0 sebagai tidak terdeteksi debris. Hasilnya memungkinkan identifikasi spasial yang jelas dan tanpa gangguan dari kondisi atmosfer dan pencahayaan terhadap sebaran marine debris (Gambar 3).



Gambar 3. Peta Citra Sebaran dan Kepadatan Marine Debris di Perairan Teluk Kendari Tahun 2023

### 3) Klasifikasi kondisi perairan dan material *debris*

Berdasarkan klasifikasi yang dikemukakan oleh Topouzelis, et al [1] (lihat Tabel 1), nilai FDI minimum (0,0506) termasuk dalam kategori Kelas 1 ( $-0,1 \leq FDI < 0,1$ ) yang merepresentasikan perairan normal tanpa debris signifikan. Sebaliknya, sebagian besar nilai FDI yang terdeteksi ( $>0,1$ ) dan nilai maksimum (0,9222) secara tegas masuk dalam kategori Kelas 3 ( $FDI \geq 0,3$ ), yang menunjukkan kemungkinan tinggi keberadaan macroplastic dan agregasi plastik padat di permukaan air. Variasi ekstrem ini mengindikasikan sebaran marine debris yang tidak merata, yang diduga kuat dipengaruhi oleh faktor hidrodinamika seperti pola arus dan angin yang memusatkan debris dari sumber antropogenik di darat ke lokasi-lokasi tertentu di teluk.

Lebih lanjut, analisis tipe material mengacu pada Garry et al., [12] (lihat Tabel 2) menunjukkan bahwa nilai minimum (0,0506) berada pada batas atas kategori air laut jernih ( $-0,15-0,05$ ), menunjukkan kondisi perairan yang relatif bersih pada lokasi tertentu. Sedangkan nilai FDI  $>0,10$  mengindikasikan dominasi material plastik. Rentang nilai 0,15–0,35 sesuai dengan karakteristik plastik transparan, sementara nilai di atas 0,30 (termasuk 0,9222) nilai maksimum sangat sesuai dengan plastik putih yang memiliki reflektansi tinggi di semua band visible. Variasi nilai yang luas juga menunjukkan kemungkinan keberadaan plastik berwarna dengan pigmentasi berbeda (rentang 0,10–0,40). Temuan ini mengungkap kompleksitas komposisi debris plastik di perairan Teluk Kendari yang didominasi oleh berbagai jenis material plastik, dengan kemungkinan kecil kontribusi material organik pada nilai FDI yang lebih rendah.

### 4) Estimasi kepadatan *debris* dan implikasi lingkungan

Analisis kuantitatif kepadatan debris dilakukan dengan mengacu pada klasifikasi dari Biermann et al., [13] (lihat Tabel 3). Nilai minimum FDI (0,0506) berada di bawah ambang batas deteksi kepadatan ( $FDI < 0,1$ ), yang menunjukkan area dengan material terapung yang tidak signifikan. Sebagian besar nilai FDI yang terdeteksi ( $>0,1$ ) mengindikasikan keberadaan debris dengan berbagai tingkat kepadatan yaitu: kepadatan sangat rendah ( $<5 \text{ g/m}^2$ ) pada FDI 0,1–0,2, kepadatan rendah ( $5-20 \text{ g/m}^2$ ) pada FDI 0,2–0,3, kepadatan sedang ( $20-50 \text{ g/m}^2$ ) pada FDI 0,3–0,4, dan kepadatan tinggi ( $>50 \text{ g/m}^2$ ) untuk FDI di atas 0,4. Nilai maksimum 0,9222 yang jauh melampaui batas kategori tinggi menandakan titik-titik akumulasi debris dengan kepadatan sangat

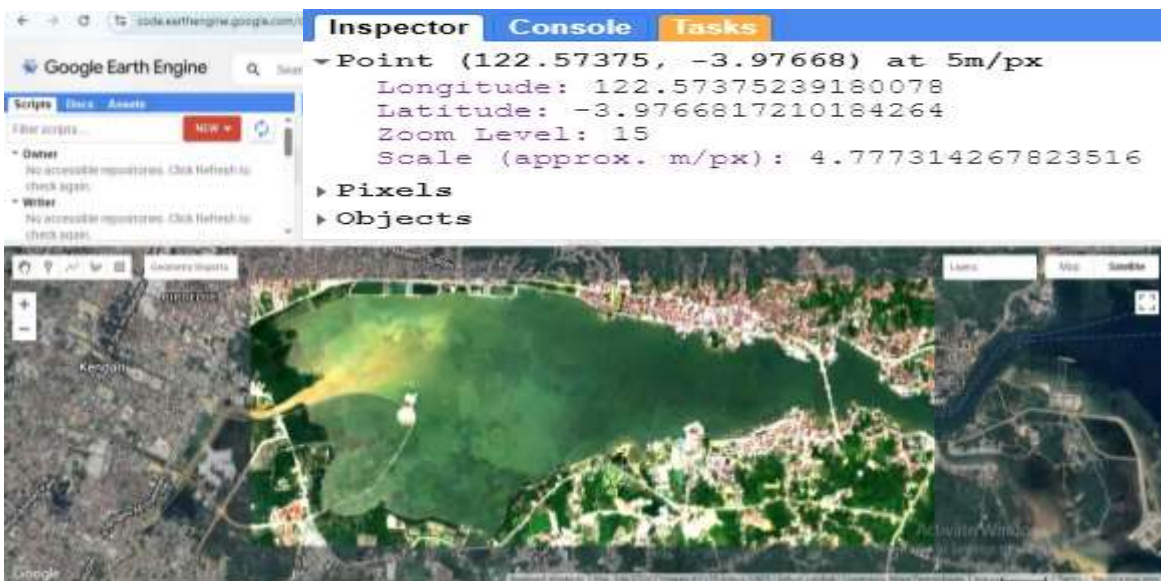
tinggi di beberapa lokasi tertentu. Hal ini mengindikasikan akumulasi macroplastic dalam konsentrasi yang mengkhawatirkan yang memerlukan tindakan mitigasi prioritas.

Temuan ini menyoroti pentingnya pendekatan pengelolaan marine debris yang terarah dan berbasis data. Hotspot dengan nilai FDI tinggi, khususnya yang berkorelasi dengan kepadatan debris yang tinggi, harus menjadi prioritas untuk program pembersihan, pemantauan rutin, dan penelusuran sumber debris. Faktor hidrodinamika yang diduga sebagai penyebab akumulasi juga perlu menjadi pertimbangan dalam perencanaan tata ruang laut dan pengendalian aliran limbah dari darat.

### 3.2. Identifikasi Sebaran dan Kepadatan Spasial Marine Debris di Perairan Teluk Kendari pada Tahun 2025 (per 01 Januari 2025 – 01 Agustus 2025)

#### 1) Visualisasi citra dan identifikasi fitur permukaan

Citra satelit Sentinel-2 dengan resolusi spasial 5 meter per piksel digunakan untuk memetakan perairan Teluk Kendari pada periode 1 Januari 2025 hingga 1 Agustus 2025. Tingkat pembesaran (zoom level) 15 pada platform GEE memungkinkan visualisasi yang sangat detail, sehingga mampu mengidentifikasi objek berukuran relatif kecil di permukaan perairan. Komposisi warna sejati (true color) yang menggabungkan band B4, B3, dan B2 menghasilkan citra yang merepresentasikan kondisi visual sebagaimana tampak oleh mata manusia. Perairan dalam dan jernih tampak berwarna biru tua, sedangkan area dengan sedimen atau kekeruhan teridentifikasi sebagai wilayah biru kehijauan atau kecoklatan. Vegetasi pesisir, termasuk hutan mangrove, ditampilkan dalam warna hijau, sementara wilayah permukiman dan infrastruktur Kota Kendari muncul dalam nuansa abu-abu. Objek mengapung dengan reflektansi tinggi, seperti kapal atau konsentrasi marine debris, terlihat sebagai area merah atau sangat terang (Gambar 4).



Gambar 4. Visualisasi Citra dan Identifikasi Fitur Permukaan di Perairan Teluk Kendari Tahun 2025

#### 2) Deteksi marine debris menggunakan FDI

FDI diterapkan untuk membedakan material asing seperti plastik, kayu, dan alga dari perairan bersih dengan memanfaatkan kombinasi band NIR, Red Edge, dan SWIR pada citra Sentinel-2. Nilai FDI dinormalisasi ke rentang 0 hingga 1 untuk menghilangkan pengaruh variasi kondisi atmosfer dan pencahayaan, sehingga memastikan konsistensi analisis. Rentang FDI yang diperoleh adalah 0,0487–0,8085. Area dengan nilai di bawah 0,0487 (biru) menunjukkan perairan bersih dengan minimal material terapung, nilai sekitar 0,4 (krem) mengindikasikan konsentrasi material sedang, dan nilai mendekati 1 (0,8085, merah) menandakan hotspot dengan konsentrasi marine debris tertinggi (Gambar 5). Klasifikasi biner kemudian dilakukan untuk memetakan sebaran marine debris, di mana piksel dengan nilai 1 dikategorikan sebagai terdeteksi debris dan nilai 0 sebagai tidak terdeteksi debris. Sehingga memberikan gambaran spasial yang jelas dan fokus mengenai distribusi marine debris tanpa gangguan noise atmosfer dan pencahayaan.



Gambar 5. Peta Citra Sebaran dan Kepadatan Marine Debris di Perairan Teluk Kendari Tahun 2025

### 3) Klasifikasi kondisi perairan dan material debris

Berdasarkan klasifikasi Topouzelis et al., [11] (lihat Tabel 1), nilai FDI minimum (0,0487) termasuk dalam kategori perairan normal (Kelas 1:  $-0,1 \leq \text{FDI} < 0,1$ ), yang menunjukkan tidak adanya debris signifikan. Sebaliknya, nilai FDI maksimum (0,8085) jauh melebihi ambang batas Kelas 3 ( $\text{FDI} \geq 0,3$ ), mengindikasikan dengan probabilitas tinggi adanya agregasi macroplastic di lokasi tertentu. Variasi nilai yang luas mencerminkan sebaran marine debris yang tidak merata dan terkonsentrasi pada hotspot tertentu, diduga akibat input antropogenik dari daratan dan aktivitas pelayaran.

Analisis lebih lanjut mengacu pada klasifikasi material oleh Garry et al., [12] (lihat Tabel 2) menunjukkan bahwa nilai terendah (0,0487) berada dalam rentang karakteristik air laut jernih ( $\text{FDI} -0,15-0,05$ ), menandakan area perairan yang masih relatif bersih. Sedangkan nilai  $\text{FDI} > 0,05$  sudah mengindikasikan keberadaan material asing. Nilai ekstrem (0,8085) jauh melampaui rentang yang umum untuk material seperti plastik putih (0,30–0,50), sehingga mengindikasikan kemungkinan kuat adanya akumulasi yang sangat padat dari macroplastic, khususnya plastik berwarna terang dengan reflektansi tinggi. Temuan ini menunjukkan heterogenitas kondisi perairan dan kompleksitas komposisi debris yang memerlukan pendekatan analitis lebih lanjut.

### 4) Estimasi kepadatan debris dan implikasi lingkungan

Berdasarkan klasifikasi kepadatan debris, nilai FDI minimum (0,0487) berada di bawah ambang deteksi kepadatan ( $\text{FDI} < 0,1$ ), menunjukkan area dengan material terapung yang tidak signifikan. Sebaliknya, nilai maksimum (0,8085) jauh melebihi batas kategori tinggi ( $\text{FDI} > 0,4$ ), yang berkorelasi dengan kepadatan debris sangat tinggi ( $> 50\text{g/m}^2$ ). Nilai ekstrem ini mengonfirmasi adanya hotspots akumulasi macroplastic yang sangat padat, diduga akibat faktor hidrodinamika seperti arus dan angin yang memusatkan debris di area tertentu, serta input limbah yang masif dari daratan.

Sebaran nilai FDI dari sangat rendah hingga sangat tinggi menggambarkan ketidakmerataan distribusi debris dan mengonfirmasi bahwa perairan Teluk Kendari mengalami tekanan pencemaran plastik yang serius pada lokasi-lokasi tertentu. Temuan ini menegaskan perlunya strategi mitigasi dan pembersihan yang terfokus, serta penguatan kebijakan pengelolaan sampah darat untuk mengurangi input debris ke perairan teluk.

Hasil analisis ini memberikan dasar ilmiah untuk pengambilan kebijakan pengelolaan marine debris yang efektif. Hotspot dengan nilai FDI tinggi harus menjadi prioritas dalam program pemantauan rutin, pembersihan terarah, dan penelusuran sumber debris. Selain itu, faktor hidrodinamika yang mempengaruhi akumulasi debris perlu diintegrasikan dalam perencanaan tata ruang laut dan pengendalian aliran limbah dari darat. Studi lanjutan dengan temporal yang lebih panjang dan resolusi sangat tinggi disarankan untuk memantau dinamika sebaran debris dan efektivitas upaya mitigasi yang dilakukan.

## 3.3 Komparasi Spasial dan Temporal Sebaran Marine Debris di Perairan Teluk Kendari (2023 vs. 2025)

### 1) Visualisasi citra dan identifikasi fitur permukaan

Analisis sebaran marine debris pada tahun 2023 vs. 2025 dilakukan menggunakan citra satelit Sentinel-2 dengan komposisi true color (band 4, 3, 2). Pada tahun 2023, citra dengan resolusi 10 meter per piksel dan zoom level 14 pada platform GEE digunakan, sementara pada tahun 2025, resolusi ditingkatkan menjadi 5 meter per piksel dengan zoom level 15, memungkinkan identifikasi objek yang lebih detail. Kedua periode menunjukkan pola visual yang serupa: perairan bersih tampak biru hingga gelap, area bervegetasi hijau,

wilayah urban abu-abu, dan objek terapung berreflektansi tinggi (berpotensi debris) teridentifikasi sebagai area cerah (krem hingga putih) di atas permukaan air.

2) Deteksi dan klasifikasi marine debris menggunakan FDI

Penerapan FDI pada kedua periode menunjukkan kemampuan yang konsisten dalam membedakan material asing dari perairan bersih. Nilai FDI yang dinormalisasi (0–1) pada tahun 2023 berkisar antara 0,0506–0,9222, sedangkan pada tahun 2025 berkisar antara 0,0487–0,8085. Nilai minimum pada kedua tahun berada dalam kategori perairan normal (Kelas 1:  $FDI < 0,1$ ), menunjukkan area dengan minimal material terapung. Sebaliknya, nilai maksimum pada kedua tahun secara jelas masuk dalam kategori Kelas 3 ( $FDI \geq 0,3$ ), mengindikasikan keberadaan macroplastic dan agregasi plastik padat. Klasifikasi biner (deteksi: 1, non-deteksi: 0) berhasil memetakan sebaran debris secara spasial dengan jelas, mengeliminasi pengaruh noise atmosfer dan pencahayaan.

3) identifikasi material dan estimasi kepadatan debris

Berdasarkan klasifikasi material oleh Garry et al., nilai  $FDI > 0,10$  pada kedua tahun menunjukkan dominasi material plastik. Rentang nilai 0,15–0,35 sesuai dengan plastik transparan, sedangkan nilai di atas 0,30 sangat sesuai dengan plastik putih berreflektansi tinggi. Nilai ekstrem yang teramati ( $> 0,80$ ) pada kedua tahun mengindikasikan akumulasi yang sangat padat dari macroplastic berwarna terang.

Estimasi kepadatan debris berdasarkan Biermann et al., menunjukkan bahwa nilai FDI minimum berada di bawah ambang deteksi kepadatan ( $< 0,1$ ). Sebagian besar nilai FDI yang terdeteksi ( $> 0,1$ ) berkorelasi dengan kepadatan yang bervariasi, dari sangat rendah ( $< 5 \text{ g/m}^2$ ) hingga sangat tinggi ( $> 50 \text{ g/m}^2$ ). Nilai maksimum tahun 2023 (0,9222) dan tahun 2025 (0,8085) jauh melampaui ambang kategori tinggi, menandakan titik akumulasi dengan kepadatan yang sangat mengkhawatirkan.

4) Komparasi temporal dan tren akumulasi

Perbandingan antara tahun 2023 vs. 2025 mengungkapkan konsistensi dalam pola sebaran dan kepadatan marine debris di perairan Teluk Kendari. Meskipun nilai maksimum FDI pada tahun 2025 (0,8085) sedikit lebih rendah dibandingkan tahun 2023 (0,9222), keduanya tetap berada dalam rentang yang sangat tinggi dan mengkonfirmasi keberadaan hotspot akumulasi yang persisten. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan antropogenik dan input limbah dari daratan masih berlangsung tanpa intervensi mitigasi yang signifikan.

5) Pengaruh faktor hidrodinamika dan spasial

Pola sebaran debris yang tidak merata dan terkonsentrasi pada hotspot tertentu pada kedua tahun diduga kuat dipengaruhi oleh faktor hidrodinamika, seperti pola arus dan angin, yang memusatkan debris dari sumber di darat ke lokasi tertentu di teluk. Hotspot ini seringkali berkorelasi dengan area dengan aktivitas antropogenik tinggi, muara sungai, dan wilayah dengan sirkulasi air terbatas.

6) Implikasi lingkungan dan manajerial

Temuan ini menyoroti urgensi untuk menerapkan strategi pengelolaan marine debris yang berbasis data dan terarah. Hotspot dengan kepadatan tinggi harus menjadi prioritas untuk program pembersihan darurat dan pemantauan rutin. Selain itu, pendekatan penelusuran sumber debris (source apportionment) perlu diintegrasikan dengan kebijakan pengelolaan sampah di darat untuk mengurangi input limbah.

Peningkatan resolusi spasial pada tahun 2025 memungkinkan deteksi yang lebih akurat terhadap objek berukuran kecil, yang mengindikasikan bahwa beban debris aktual mungkin lebih besar daripada yang terdeteksi pada tahun 2023. Oleh karena itu, penggunaan citra resolusi sangat tinggi sangat disarankan untuk pemantauan berkelanjutan.

7) Kebutuhan studi lanjutan

Penelitian lebih lanjut dengan analisis temporal yang lebih panjang dan resolusi lebih tinggi diperlukan untuk memahami dinamika musiman dan tahunan sebaran debris, serta untuk mengevaluasi efektivitas kebijakan dan program mitigasi yang diterapkan. Integrasi dengan data hidro-oseanografi dan pemodelan numerik akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang mekanisme transportasi dan akumulasi marine debris di perairan Teluk Kendari.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi, memetakan, dan menganalisis sebaran serta kepadatan marine debris di perairan Teluk Kendari dengan memanfaatkan citra satelit Sentinel-2 dan algoritma FDI dalam platform GEE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebaran marine debris tidak merata, dengan konsentrasi tertinggi (hotspot) terdeteksi di daerah dekat muara sungai, pelabuhan, dan area dengan aktivitas antropogenik tinggi, yang menegaskan adanya pengaruh signifikan dari input sampah daratan dan aktivitas manusia. Nilai FDI yang terukur pada tahun 2023 dan 2025 masing-masing berkisar antara 0,0506–0,9222 serta 0,0487–0,8085, dengan nilai maksimum pada kedua tahun termasuk dalam kategori Kelas 3 ( $FDI \geq 0,3$ ), yang mengindikasikan keberadaan macroplastic dan agregasi plastik padat. Estimasi kepadatan debris berdasarkan klasifikasi Biermann et al. menunjukkan adanya titik akumulasi dengan kepadatan sangat tinggi ( $>50 \text{ g/m}^2$ ), terutama di lokasi yang sama pada kedua tahun, sehingga menandakan adanya akumulasi yang persisten dan mengkhawatirkan. Lebih lanjut, tidak terdapat perubahan signifikan dalam pola sebaran dan kepadatan marine debris antara tahun 2023 dan 2025, meskipun resolusi citra tahun 2025 lebih tinggi (5 m), yang mengindikasikan bahwa tekanan antropogenik dan input sampah ke perairan teluk masih terus berlanjut tanpa adanya intervensi mitigasi yang efektif. Selain itu, faktor hidrodinamika seperti arus laut, angin, dan morfologi teluk yang semi-tertutup juga berperan penting dalam memusatkan debris di lokasi tertentu.

#### Referensi

1. J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, and K. L. Law, "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, 2015, doi: 10.1126/science.1260352.
2. UNEP, *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. United Nations Environment Programme, 2021. [Online]. Available: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>
3. L. C. M. Lebreton, J. van der Zwet, J.-W. Damsteeg, B. Slat, A. Andrady, and J. Reisser, "River plastic emissions to the world's oceans," *Nature Communications*, vol. 8, no. 1, p. 15611, 2017, doi: 10.1038/ncomms15611.
4. D. Rumahlatu, K. Sangur, and J. Sangur, "The community structure of macrozoobenthos as a bioindicator of water quality in the coastal waters of Kendari Bay, Indonesia," *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, vol. 22, no. 2, 2021, doi: 10.13057/biodiv/d220237.
5. A. Salim, D. A. T. Pulubuhu, S. R. Hamzah, and Yuliska, "The Impact of Plastic Waste on the Sustainability of Marine and Coastal Ecosystems: A Study from Kendari Bay, Indonesia," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 989, no. 1, p. 012027, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/989/1/012027.
6. N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031
7. A. Misasi, G. Ceriola, and R. Corrado, "A Google Earth Engine Algorithm to Map Plastic Debris in the Ocean," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 19, p. 4962, 2022, doi: 10.3390/rs14194962.
8. K. Topouzelis, A. Papakonstantinou, and S. P. Garaba, "Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018)," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 79, pp. 175–183, 2019, doi: 10.1016/j.jag.2019.03.011.
9. S. P. Garaba and H. M. Dierssen, "An airborne remote sensing case study of synthetic hydrocarbon detection using short wave infrared absorption features identified from marine-harvested macro- and microplastics," *Remote Sensing of Environment*, vol. 205, pp. 224–235, 2018, doi: 10.1016/j.rse.2017.11.023.
10. M. N. Torres, J. Dominguez, and A. Carrassón, "A cloud-based multi-temporal approach to mapping plastic debris in the marine environment," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 104, p. 102568, 2021, doi: 10.1016/j.jag.2021.102568.
11. K. Topouzelis, D. Papageorgiou, A. Karagaitanakis, A. Papakonstantinou, and M. Arias Ballesteros, "Remote sensing of sea surface artificial floating plastic targets with Sentinel-2 and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2019)," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 12, p. 2013, 2020, doi: 10.3390/rs12122013.
12. F. K. Garry, P. W. Russell, and V. V. Miles, "Classification of floating plastic debris in the Mediterranean Sea using Sentinel-2 imagery," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 173, p. 113121, 2021, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.113121.
13. L. Biermann, D. Clewley, V. Martinez-Vicente, and K. Topouzelis, "Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-62298-z.